

**М. В. Майсурадзе<sup>\*</sup>, М. А. Рыжков**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

<sup>\*</sup>*spirallog@gmail.com*

## АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ СОВРЕМЕННЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Изучены дефекты современных низкоуглеродистых машиностроительных сталей 18Х2Н4МА, 25Х2Н4МА, 25Г2С2Н2МА. Показано, что наиболее часто встречающимися дефектами металлургического передела являются неметаллические включения, структурная полосчатость. Установлено, что включения карбонитрида титана значительно снижают эксплуатационную стойкость тяжело нагруженных деталей. Рассмотрены дефекты, формирующиеся при термической и химико-термической обработке деталей.

*Ключевые слова:* сталь, дефекты, неметаллические включения, структурная полосчатость, термическая обработка.

***М. V. Maisuradze, M. A. Ryzhkov***

## DEFECTS IN MODERN ENGINEERING STEELS

Defects of modern low-carbon engineering steels 18Kh2N4MA, 25Kh2N4MA, 25G2S2N2MA were studied. It was shown that the most frequently encountered defects in metallurgical processing are: non-metallic inclusions, microstructure banding. It has been established that the inclusion of titanium carbonitride significantly reduces the operational durability of heavily loaded parts. The defects formed during heat treatment and chemical-thermal processing of parts were also considered.

*Keywords:* steel, defects, non-metallic inclusions, microstructure banding, cracks, heat treatment.

Сталь является самым распространенным конструкционным материалом в современном машиностроении [1]. Для производства ответственных деталей применяются высококачественные стали [2], которые отвечают самым жестким требованиям к химическому составу, чистоте по неметаллическим включениям, однородности микроструктуры и механических свойств. Тем не менее, в ходе анализа причин преждевременных поломок машиностроительных деталей [3] зачастую выявляются дефекты металла, образовавшиеся на разных этапах

производства – от кристаллизации до финальной термической и механической обработки.

Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1. Из данных сталей было изготовлено несколько партий машиностроительных деталей различного типоразмера. Детали из сталей 18Х2Н4МА и 25Х2Н4МА подвергались химико-термической обработке (цементации) для получения прочного, износостойкого поверхностного слоя. Для деталей из стали 25Г2С2Н2МА термическая обработка заключалась в объемной закалке в масле с последующим двукратным высокотемпературным отпуском [4].

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей, масс. %

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
18Х2Н4МА	0,17	0,27	0,30	1,45	4,15	0,32	0,12	0,008	0,016
25Х2Н4МА	0,26	0,25	0,34	1,48	4,16	0,35	0,19	0,004	0,007
25Г2С2Н2МА	0,24	1,42	1,35	0,31	1,71	0,40	0,21	0,005	0,007

*Структурная неоднородность.* Структурная неоднородность негативно сказывается на эксплуатационной стойкости деталей. На рис. 1 приведена микроструктура детали из стали 18Х2Н4МА после термической обработки. В поперечном сечении наблюдается пятнистая дендритообразная структура, состоящая из темных бейнитных участков и светлых мартенситных участков. Вдоль направления прокатки микроструктура представляет собой чередующиеся сплошные полосы бейнита и мартенсита.

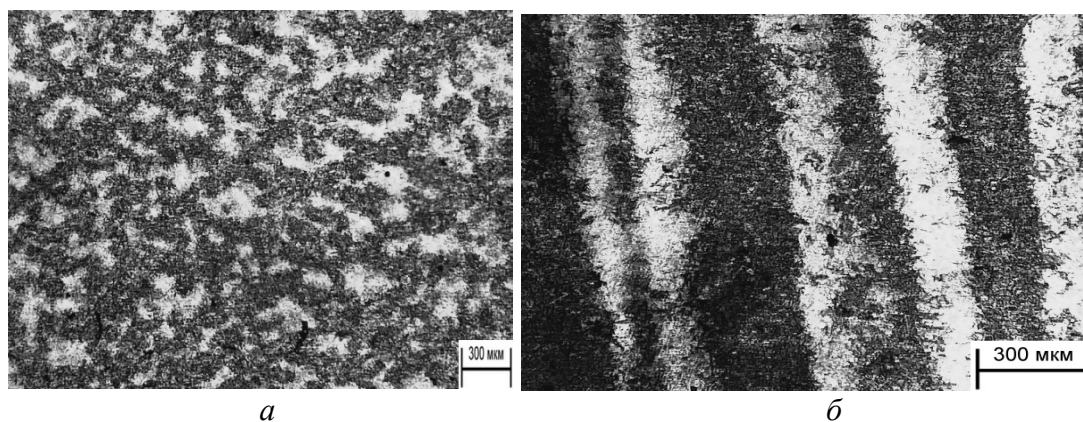


Рис. 1. Микроструктура стали 18Х2Н4МА: *а* – поперечное сечение; *б* – продольное сечение

Установлено, что структурная полосчатость является причиной анизотропии ударной вязкости машиностроительных сталей. Так, для образцов, ориентированных поперек направления прокатки (концентратор напряжения ориентирован вдоль полос микроструктуры), значение ударной вязкости оказывалось в 2...5 раз меньше, чем для образцов, ориентированных вдоль направления прокатки (концентратор напряжения ориентирован поперек полос микроструктуры).

Уменьшить степень структурной неоднородности можно путем проведения гомогенизирующего отжига стали после кристаллизации. Например, сталь 25Г2С2Н2МА, произведенная с использованием гомогенизирующего отжига, обладала значительно более однородной микроструктурой по сравнению со сталью той же марки, произведенной без использования гомогенизации. Индекс анизотропии стали, рассчитанный по методике ГОСТ Р 54570, составил  $4 \pm 1$  для гомогенизированной стали, а для стали, не подвергавшейся гомогенизации –  $9 \pm 1$  [5].

*Неметаллические включения.* На примере стали 18Х2Н4МА проведен анализ химического состава неметаллических включений, обычно наблюдающихся в низкоуглеродистых конструкционных сталях промышленной выплавки. Установлено, что в машиностроительных сталях присутствуют три основных типа включений: карбонитриды титана (рис. 2 а), имеющие правильную геометрическую форму; оксиды магния и алюминия (рис. 2, б), имеющие округлую форму; сульфиды марганца (рис. 2, в), имеющие строчечную форму.

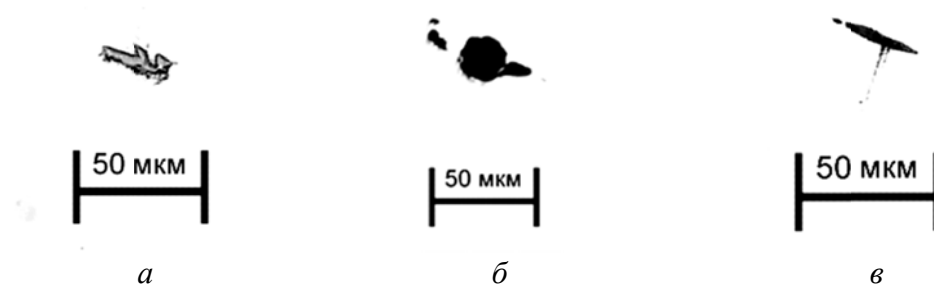


Рис. 2. Неметаллические включения в стали 18Х2Н4МА:  
а – карбонитрид титана; б – оксид магния, алюминия; в – сульфид марганца

Подсчет количества неметаллических включений в стали 18Х2Н4МА на продольном шлифе площадью  $25 \times 25 \text{ мм}^2$  показал, что наиболее часто в стали встречаются включения карбонитрида титана (62,5 % от всех включений). Установлено влияние неметаллических включений на эксплуатационную стойкость машиностроительных деталей. При одинаковом содержании оксидных и сульфидных включений (соответственно 38...40 шт. и 6...10 шт. на  $1 \text{ см}^2$  исследованной площади

шлифа) увеличение количества включений карбонитрида титана в 5 раз (от 40 до 200 шт/см<sup>2</sup>) привело к снижению эксплуатационной стойкости деталей более, чем в 10 раз. Таким образом, включения карбонитрида титана наиболее опасны с точки зрения развития усталостного разрушения вследствие того, что они обладают острыми гранями и углами, являющимися внутренними концентраторами напряжений.

*Дефекты термообработки.* В процессе цементации или нитроцементации происходит насыщение поверхностного слоя стальных деталей углеродом. Отсутствие контроля над углеродным потенциалом атмосферы может приводить к чрезмерному насыщению поверхности углеродом, что зачастую приводит к образованию в поверхностном слое избыточной карбидной фазы в виде тонкой (рис. 3, а) или массивной (рис. 3, б) карбидной сетки по границам зерен. Наличие хрупкой карбидной фазы на границах зерен недопустимо для ответственных машиностроительных деталей, поскольку она значительно понижает вязкость и пластичность металла, что, в свою очередь, приводит к сколам, выкрашиванию поверхностного слоя, облегченному зарождению усталостных трещин.

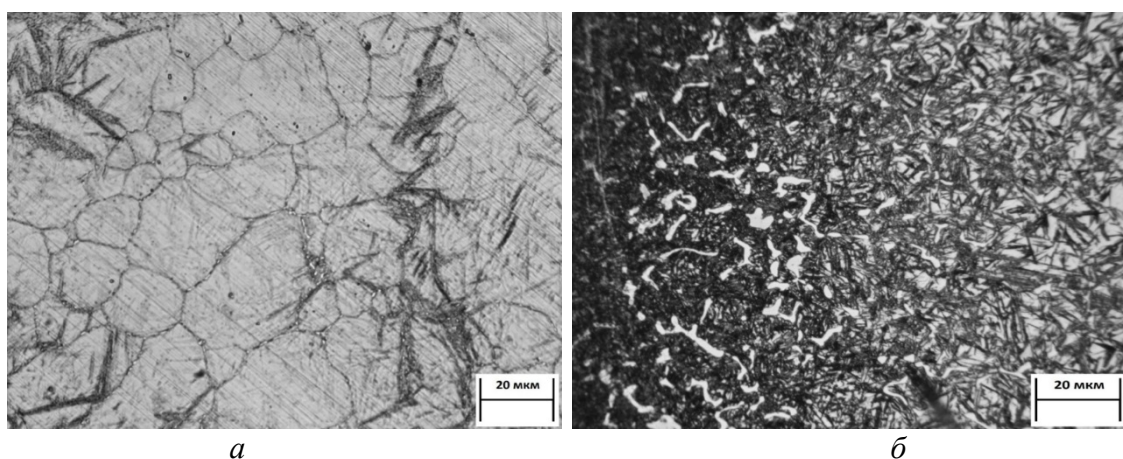


Рис. 3. Избыточная карбидная фаза в структуре поверхностного слоя после цементации стальных деталей: а – сталь 25Х2Н4Мn, тонкая карбидная сетка; б – сталь 18Х2Н4Мn, массивная карбидная сетка

При повышенном содержании углерода в сталях, имеющих в составе более 3 масс. % никеля, после закалки в поверхностном слое может сохраняться значительное количество остаточного аустенита (рис. 4). Высокоуглеродистый остаточный аустенит имеет пониженную твердость (порядка 40 HRC), вследствие чего износостойкость детали будет понижена. Кроме того, при ударных и динамических нагрузках в процессе эксплуатации деталей остаточный аустенит может превращаться в хрупкий высокоуглеродистый мартенсит.

В результате высокотемпературного нагрева под закалку или нормализацию происходит интенсивное обезуглероживание – снижение содержания углерода в поверхностном слое стальной детали. Обезуглероживание приводит к снижению твердости поверхности, а, следовательно, и усталостной прочности металла. В структуре поверхности при этом может наблюдаться феррит и бейнит, а непосредственно вблизи поверхности – зона внутреннего окисления границ зерен.

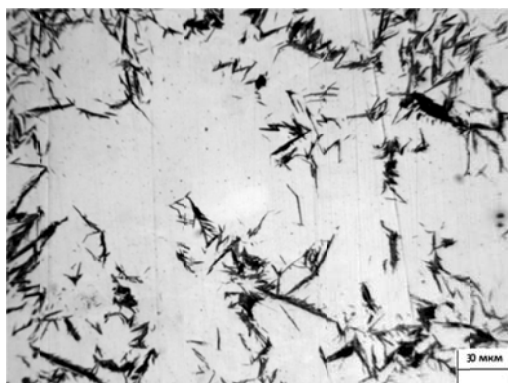


Рис. 4. Остаточный аустенит (светлый) в структуре цементованного слоя детали из стали 18X2H4MA

Обезуглероживание поверхности при наличии зоны внутреннего окисления границ зерен облегчает зарождение и распространение усталостных трещин в процессе эксплуатации, что снижает стойкость и надежность деталей [4].

*Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-7929.2016.8.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bhadeshia H. K. D. H. Steels: Microstructure and Properties / H. K. D. H. Bhadeshia, R. W. K. Honeycombe. UK : Elsevier, 2017. 461 p.
2. Łomozikn M. Modern martensitic steels for power industry / M. Łomozikn, M. Zeman, J. Brozda // Archives Of Civil And Mechanical Engineering. 2012. Vol. 12. P. 49–59.
3. Failure analysis of gears, shafts and keys of centrifugal washers failed during life test / A. Lanzutti [et al.] // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 79. P. 634–641.
4. Майсурадзе М. В. Влияние термической обработки на микроструктуру и механические свойства высокопрочной кремнистой стали / М. В. Майсурадзе, М. А. Рыжков, О. А. Сурнаева // Сталь. 2016. № 6. С. 62–66.
5. Влияние технологии производства на фазовые и структурные превращения кремнийсодержащей стали / М. В. Майсурадзе [и др.] // Сталь. 2017. № 1. С. 52–58.